

回転磁石マーカに基づくスマートフォン位置推定

武島 知勲¹ 梶 克彦² 廣井 慧³ 河口 信夫³ 神山 剛⁴ 太田 賢⁵ 稲村 浩⁶

概要：本研究では意図的に特徴的な磁場を生成する磁場マーカを作成し、環境に設置して歩行者が所持しているスマートフォンのような端末での磁場の計測により位置推定を行う。磁場マーカにより特徴的な磁場を狭い範囲に限定して生成し、磁場マーカからの相対的な距離と角度を推定し詳細な位置推定を行う。提案する磁場マーカは、磁石の回転により特徴的な磁場を発生させ、かつ磁場マーカの磁石の向きとスマートフォンの磁気センサの値が極値を取るタイミングから、マーカとスマートフォン間の相対的な位置を推定する。提案手法は、磁場マーカとスマートフォンの距離を推定する距離推定と、磁場マーカとの相対角度推定の2段階で構成される。磁場マーカとスマートフォンとの距離の推定は2m以内ならば最大で13cm以下の平均誤差で推定でき、1.4m以内の範囲であれば4cm以内の誤差で推定可能である。磁場マーカから見たスマートフォンの方角の推定は平均誤差が24度で標準偏差が29度の精度であった。

A Smartphone Positioning Method Based on Spinning Magnet Marker

Chihiro Takeshima¹ Katsuhiko Kaji² Kei Hiroi³ Nobuo Kawaguchi³ Takeshi Kamiyama⁴ Ken Ohta⁵
Hiroshi Inamura⁶

1. はじめに

様々なセンサを搭載したスマートフォンの普及に伴い、Moves や GoogleMaps, Foursquare のような位置情報を用いるサービスが増加している。このような位置情報を用いるサービスにとって位置情報の取得方法は重要である。屋外ではGPSが利用できるため高精度でユーザの位置を取得できるが、屋内ではGPSの利用は困難である。そのため屋内でも利用可能な位置推定手法が必要である。

屋内での歩行者の位置推定手法には歩行者デッドレコニングのような相対位置を推定する手法 [1] や Wi-Fi 基地局

や Bluetooth を用いた位置推定のように絶対位置を推定する手法 [2][3] 等がある。これらの手法にはそれぞれ利点と欠点があり組み合わせられて用いられる場合が多い [4]。

磁場は屋内位置推定に有効な情報の一つである [5], [6]。スマートフォンには磁気センサ (コンパスセンサ) が搭載されており、磁場を計測可能である。屋外であれば地磁気を計測して方位を計測可能であるが、屋内では建物内に埋め込まれている鉄骨が発する残留磁場によって方位を正しく取得できない。この残留磁場の Fingerprint が位置推定の手がかりとなる [5], [6]。しかし、これまでの研究から、残留磁場を利用した手法は位置推定精度が環境に依存してしまうという問題が明らかになった。他の場所に比べて特徴的な磁場であれば高い精度で推定できるが、特徴の無い場所であると精度が低くなってしまふ。そのため環境に依存しない位置推定を磁場を用いて行うためには、磁場的に特徴の少ない場所に特徴的な磁場を発生させる機器の設置が有効と考えられる。

我々はこれまでに、意図的に特徴的な磁場を生成する磁場マーカによる位置推定手法を提案している [7]。作成した磁場マーカでは特定の周波数で磁石を回転させ、スマートフォンで観測した磁場の変動値を FFT にかけて周波数を読

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University
² 愛知工業大学 情報科学部
Faculty of Information Science, Aichi Institute of Technology
³ 名古屋大学 未来社会創造機構
Institute of Innovation for Future Society, Nagoya University
⁴ NTT ドコモ サービスイノベーション部
Service Innovation Department, NTT DOCOMO, INC.
⁵ NTT ドコモ 先進技術研究所
Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC.
⁶ 公立はこだて未来大学 システム情報科学部
School of Systems Information Science, Future University Hakodate

み取りマーカの ID を識別する。提案手法では、磁場マーカ ID の単純な検出と、2つの磁場マーカを用いた歩行者の通過方向検出を実現している。

本研究では上記の研究を発展させ、スマートフォンユーザが磁場マーカ圏内のどこにいるかという、詳細な位置を推定するためのマーカデバイスと検出手法を提案する。本磁場マーカは店舗内のように高精度に位置を推定する必要がある場合での使用を想定している。例えば、店舗内で現在位置から目的とする商品のある棚までのナビゲーションをする際には数 m 誤差があると、目的とする棚の前ではない場所にいるのに目的の棚の前にいると推定してしまう。しかし磁場マーカが影響を与える狭いエリア内で詳細な位置が推定可能になれば、利用者が目的とする棚の前にいるかだけでなく、目的とする商品の前にいるかまで取得可能になると考えている。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2 章で BLE や磁場を用いた絶対位置推定の研究について述べる。3 章で磁場マーカを設計し、4 章で磁場マーカの実装について述べる。5 章で磁場マーカ圏内の詳細位置推定手法について述べ、6 章で提案手法の評価実験を行う。最後に 7 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

Bluetooth 受信機を搭載した携帯端末の普及により、Bluetooth を用いた位置推定も盛んに行われるようになった。WiFi 基地局を用いた位置推定と異なるのは電波到達可能距離や Bluetooth は無線 LAN の無い環境でも利用できる点等である。Bluetooth を用いた位置推定では BLE (Bluetooth Low Energy) ビーコン (以後、ビーコン) から受信する電波の RSSI を利用して観測者の位置を推定する。位置推定手法としては FingerPrint を作成する手法 [8] や観測できる複数のビーコンからの距離を RSSI で計算し位置を推定する手法 [9] がある。Bluetooth を用いた位置推定では環境にビーコンを設置するコストが低く、ビーコンは安いものでは数百円で購入できる。しかし、ビーコン圏内のどこにいるかという詳細な位置情報を獲得するためには、多数のビーコンの設置と、FingerPrint 作成のための電波環境調査が事前に必要となる。

磁場を用いた位置推定手法として、コイルを環境に設置して位置推定を行う研究も存在する [10][11]。Guido らの手法 [10] では環境内に高周波の磁場を発生する送信用コイルを設置し、受信用コイルの位置を推定する。送信用コイルが発する磁場により受信用コイルに電圧が発生し、発生した電圧から送信用コイルからの相対的な距離や方向を推定する。Guido らの手法では 1.8kHz 以上を利用している。Jörg らの手法 [11] では環境内に複数のコイルを設置し、50Hz 程度の周波数の磁場を発生させる。磁場を発生させているコイルの区別のためにコイルは順番に動か

す。コイルと計測器との距離を磁場の振幅で計算し、複数のコイルとの距離から位置を推定する。これらの手法は位置推定の精度が高く、Guido らの手法では実験環境では推定誤差が 10cm 以内である。しかしこれらの手法を歩行者の位置推定に利用するためにはいくつか課題がある。まずスマートフォンに搭載されている磁気センサでは高周波の磁場を計測できない問題がある。スマートフォンに搭載されている磁気センサのサンプリング周波数は数十 Hz である。例えば、Nexus 5 では磁気センサのサンプリング周波数は 60Hz である。サンプリング定理によってサンプリング周波数の半分の周波数までの周波数しか正確に計測できない。そのため Guido らの手法のように数 kHz の磁場を利用した位置推定は現在のスマートフォンではできない。またコイルの設置、維持コストの問題がある。Jörg らの手法で利用しているコイルは直径 50cm であり、電流は 15A を使用している。このようなコイルを環境内に複数設置して使用するには維持コストが掛かり過ぎる。また環境内に設置するには直径 50cm は大き過ぎると考える。

3. 磁場マーカの設計

我々の手法では、狭いエリアに限定して高い精度で検出できるように磁場を利用する。磁石やコイルなどの磁場は距離の 2 乗から 3 乗に比例して減衰するため、特定の範囲内のみに影響を与えやすい。しかし、一般的な屋内環境に存在する磁場 (以下、環境磁場) を利用すると場所によっては磁場マーカを検出できない可能性があるため、意図的に磁場を生成する必要がある。磁場マーカを生成し、それを磁気センサの値から検出するためには一般的な屋内環境に存在しない磁場にしなければ過検出の原因となる。この章ではまず環境磁場について述べ、その後に磁場マーカの生成について述べていく。

3.1 一般的な屋内の環境に存在する磁場 (環境磁場)

環境磁場とは、主に地磁気と残留磁気により生じる磁場である。残留磁気とは鉄骨等の金属が帯びている磁気である [12]。本稿では残留磁気により生じる磁場を残留磁場と定義する。

図 1 に歩行者がスマートフォンの姿勢を固定して建物内を直進歩行した時に観測される磁場の変化の例を挙げる。図 1 に示すように端末の姿勢を固定して測定しているのに端末の移動によって磁場が変化する。これは、建物の構造等に用いられる鉄骨が場所ごとに異なり残留磁場が場所ごとに異なるためである。

新納は屋内で発生しうる磁場について調べている [12]。新納は環境磁場を直流磁場、交流磁場、変動磁場の 3 つに分類した。直流磁場は磁石と直流電流によって発生する時間的に変動しない磁場である。交流磁場は交流電流によって発生する強さと方向が周期的に変化する磁場で、交流磁

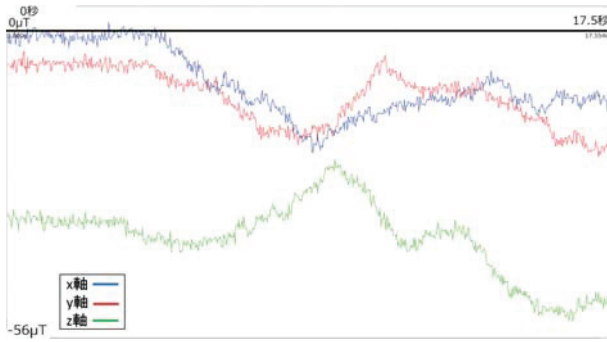


図1 端末姿勢を固定して直進歩行した時の磁気の時系列変化

場の周波数は主に商用周波数である 50/60Hz と等しくなる。変動磁場はその他の原因で生じる 1Hz 以下の周波数の変動を示す磁場である。

新納は様々な環境磁場について計測している。地磁気により生じる磁場は直流磁場で磁場の強さは屋外では $46\mu\text{T}$ であるが屋内では鉄骨や鉄筋などの影響を受けて 10-30%減少している。残留磁場は直流磁場であり磁場の強さは床から 1m 離れた位置では最大で $130\mu\text{T}$ と述べられている。またエレベータや屋内電気機器の発生する磁場は交流磁場であり、磁場の強さは約 $1\mu\text{T}$ 以下と述べられている。

これらから環境磁場について考える。屋内では移動によって生じる磁場の変化の原因は残留磁場が主である。地磁気は鉄骨や鉄筋などの影響を受けて一様ではなくなっているが、その影響は残留磁場として考え無視すると、磁場の変化の原因となるのは残留磁場である。残留磁場の強さ分の変化はし得ると考えると、移動により生じる磁場の変化の大きさとして $130\mu\text{T}$ まではあり得る。磁場の変化の周波数を考えると主に交流磁場と変動磁場の影響を受けるので磁場の変化の周波数は 1Hz 以下と 50/60Hz となる。

3.2 一般的な屋内の環境に存在しない磁場の生成手法

前節により環境磁場と区別ができる磁場マーカを生成するためには、移動によって生じる磁場変化を $130\mu\text{T}$ 以上にするか 1Hz より大きく 50Hz 未満の周波数の変化を起こす必要がある。我々は環境磁場と区別ができる磁場マーカを生成するために以下の 2 つ手法を考えた。

A：複数の強力な磁石を静的に設置してノイズと区別できる大きさの変化を複数回起こす方法

B：磁場を 3-25Hz 程度の周波数で周期的に変化させる方法

A は磁石を設置するだけなので維持コストはかからないというメリットがある。しかし $130\mu\text{T}$ 以上の磁場を床から 1m の地点に発生させるには、とても強力な磁石が必要である。例えば直径 10cm 長さ 10cm のネオジウム磁石を設置する必要がある。このような磁石は高価であるため設置コストが高くなる。また誤って磁石に電子機器を近づけると故障の原因となる [12] ため A の手法は取らず、B の手法

を利用して磁場を生成することにした。

3.3 磁場の変化による磁場マーカの生成

B の磁場の変化による磁場マーカの生成では意図的に環境磁場を周期的に変化させて特徴的な磁場を生成する。磁場を周期的に変化させる方法の 1 つにコイルを用いた方法が存在する。コイルが発生する磁場の式を式 1 に示す [13]。

$$B[T] = \frac{\mu_0 I n a^2}{2(a^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

式 1 の B は磁束密度、 μ_0 は真空の透磁率、I は電流、n はコイルの巻き数、a はコイルの半径、z はコイルと計測点との距離である。コイルから 1m 離れた位置に $10\mu\text{T}$ 以上の変化を起こすためには表 1 の様な場合が考えられる。

表 1 式 1 より導出した各条件での電流量

直径	巻き数	必要な電流量
2m	1000	45mA
2cm	1000	1.8A

コイルの直径を大きくすると必要な電流量は小さくなるが、設置場所が限定されてしまう。コイルの直径を小さくすると必要な電流量が大きくなり、維持コストが高くなってしまふ。磁場マーカは長時間の使用を想定しているため維持コストは低く抑える必要があり、コイルを使用した磁場の生成は行わなかった。

他に磁場を変化させる方法として、モータで磁石を回転させて特徴的な磁場を生成する手法がある。磁石の回転により磁場は周期的な変化をする。例えば磁石を周波数 a[Hz] で回転させた場合、周囲で観測される磁場の変動を FFT(高速フーリエ変換) で周波数分析すると a[Hz] を多く含んでいる。このように磁石の回転周期と磁場の変動周期は等しくなる。モータで磁石を回転させる際には磁場を発生させるために電力を必要とせず、磁石を回転させるコストだけで周期的な磁場を生成できる。磁石にも依るが回転方法の工夫により必要な電力は抑えられると考えられる。これらの理由により磁石を用いて磁場マーカを作成した。

4. 磁場マーカの実装

4.1 理論式による磁石の形状の決定

磁石の形状を決める前に磁場の強度について考える。本手法は屋内での使用を考えているため強力な磁石を屋内に設置する必要がある。また歩行者の通過や位置を検出するために磁場マーカの近くを歩行者が通過する。そのため、歩行者が持っている磁気カードへの影響を考えなければならない。磁気カードが許容できる磁場の強さは直流磁場ならば 40-65mT で交流磁場なら 16-30mT である [12]。本手法では磁石は回転し磁場は時間で変化するので交流磁場と考えられる。そのため、交流磁場の 16-30mT を目安に考

える。磁気カードの許容できる磁場は 30mT が最大となっているが、実用性に考えて最小値の 16mT を基準に考えていく。

次に歩行者が磁石にどれほど接近するかを検討する。静止している障害物に対する回避行動に関する研究が存在する [14]。松永の行った実験では、歩行者が静止している障害物に対して行う回避行動は携帯電話の使用に関わらず歩行者の空間に基づいていると明らかにした。歩行者は自身の体を中心として接触領域、非接触領域、快適領域、通り抜け領域という領域を持つ。歩行者は障害物を避けて通過する場合、障害物が非接触領域に入らないように回避して通過する。体の側面だけを考えると人の体から非接触領域までの距離は 45cm である。これにより歩行者が磁石に対して 45cm 以内には接近する可能性は低いと考えられる。しかし、複数の人が通過する場合もこの通りとは限らないため磁石から 15cm 以内に近づけないようにし安全性を確保する。

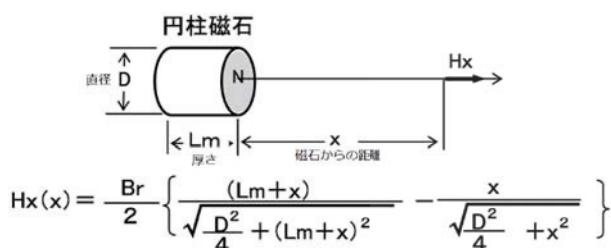


図 2 円柱磁石が作る中心軸上の磁界分布

磁石の磁場が 15cm 離れた位置において磁気カードに影響を与えず、1m 離れた位置においても十分な影響を与えられるように磁石の形状を決定する。1m 離れた位置で磁場の変化幅が約 $10\mu\text{T}$ になるようにする。安全性を考えて磁石から 10cm の位置で磁場の強さは 16mT 以下になるようにした。円柱磁石が作る中心軸上の磁界分布 $H_x(x)$ は図 2 のように計算できる [15]。この式の Br は標準的なネオジム磁石の残留磁束密度 12000G を利用する。磁石から 1m の位置で磁場の強さが $5\mu\text{T}$ 以上で 10cm の位置で磁場の強さが 16mT 以下になる形状は直径 D が 2cm で厚さ L_m が 10cm の円柱磁石である。

しかし、この磁石では 1m 離れた位置に十分な影響を与えられていない。そこで磁石の材質を変え図 2 の Br が 14300G になる材質に変え、形状も直径 2.5cm、長さ 6cm にした。この磁石は 1m 離れた位置で磁場の強さが $6\mu\text{T}$ になり、10cm 離れた位置で磁場の強さが 16mT を超えない(表 2)。この磁石を用いた実験では 1m 離れた位置でも十分な影響を与えられていると考えられる。

表 2 磁石の形状と 1m 離れた位置での磁場の強さ

磁石直径 [cm]	磁石高さ [cm]	残留磁束密度 [G]	磁場強さ [μ]
2	10	12000	5
2.5	6	14300	6

5. 既存モータでの試作

まず磁石を回転させる機構を既存モータを用いて構築した。図 3 に既存モータを用いて構築した磁場マーカを示す。モータには速度を変えられるようにするために TAMIYA のミニモーター多段ギヤボックス (12 速) [16] を用いた。このモータはギアの変更により回転速度を変更できるため、磁石の回転速度を容易に変更できる。

既存モータによる磁場マーカの構築は容易に作成できる利点があるが、稼働時の騒音や長時間の稼働の困難さ、磁石が大きくなるほど安定した運用が難しい等欠点が判明した。我々は磁場マーカの長期的な運用を考えているため既存モータによる磁場マーカの構築ではなく、次節で述べる実装方法を採用した。



図 3 既存モータを用いて構築した磁場マーカ

5.1 3D プリンタを用いた実装

長期間の安定運用を可能にするため、我々は回転させる磁石で簡易的なモータの作成を考えた。ステッピングモータの原理は図 4 のように中心に磁石を設置し、周囲に配置したコイルに順番に電流を流して回転させる [17]。我々は回転させる磁石を中心に周囲にコイルを設置し、電流を流すタイミングの制御によって磁石を回転させられると考えた。

作成した磁場マーカを図 5 に示す。磁石の周りに 2 つのコイルと 2 つのセンサを設置した。センサは磁石の接近のみを検出するリードスイッチを用いた。センサが ON になった時にコイルに電流を流して磁石を回転させる。コイルの制御には超低消費電力の 32 ビット・マイクロコントローラである Zero Gecko [18] を用いた。この Zero Gecko でセンサの入力を受け取り、コイルを制御し磁石を回転させた。

磁石は回転を維持しやすくするために摩擦を減らす工夫を行った。まず回転軸にはボールベアリングを用いて軸棒との摩擦を減らした。次に軸棒以外との接触も回転を阻害する原因となるため軸棒以外と接触しない構造を考えた。図6に示すように回転させる磁石と土台に浮かす用の磁石を付けて浮遊させている。これにより、磁石の大きさや重量に依らず回転を維持しやすくなっている。

作成した磁場マーカは既存モータに比べて長時間稼働させても問題なく動作し稼働時の騒音も小さくなったがいくつか課題があった。稼働できる回転速度が3Hzから7Hzと狭く、磁場マーカの作り出せる識別子の数の少なさや回転させるまでの手間が課題であった。これはコイルに向いている磁石の磁極がリードスイッチでは取得できないためである。コイルに流せる電流の向きが変更できないため、磁石を加速できるタイミングは特定の磁極がコイルを向いた時のみになる。しかし、コイルに近づいている磁石の磁極は取得できないため確実に正しい磁極の時にコイルに電流を流すのは難しい。そこで、一番最初に近づいてきた磁極をN極であると想定してコイルを制御していた。これにより実際にN極が来るように回転をさせる必要があり、ただ回転させるだけでは稼働できない場合があった。

そこでこれらの課題を解決するためにさらに改良を行った。改良後の磁場マーカを図7に示す。改良前との違いは以下の3点である。

改良点1：センサを磁石の接近のみしか検出できないリードスイッチから磁場の強さを計測できるホールセンサに変更

改良点2：コイルに流せる電流の向きを変更できるようにフルブリッジ回路に変更

改良点3：コイル制御用回路を3Dプリンタ内部に収納

改良点1によってコイルに近づいている磁石の磁極が取得できる。これによりコイルに電流を流すタイミングの制御を磁石の磁極を考慮して行えるため回転させるまでの手間を削減できる。改良点2によって、コイルに近づいている磁極に依らず磁石を加速可能となった。これにより、磁石が1回転する間に加速できる回数が2回から4回に増加し、最高回転速度が10Hzに向上した。改良点3により回路と外部との接触が少なくなり、磁場マーカの持ち運びによって回路が故障するといった問題が無くなった。

また、2つのホールセンサの計測値をUARTで送信できる機能を備えた。UARTの通信速度は115200bpsであり、ホールセンサの値を50Hz以上の速度で送信可能である。これにより、受け取り側は磁石がどのような角度になっているかをホールセンサの値から推定可能になる。この通信機能は次章の角度推定において使用する。

6. 磁場マーカ圏内の詳細位置推定手法

本章では磁場マーカ圏内の詳細な位置を推定する手法

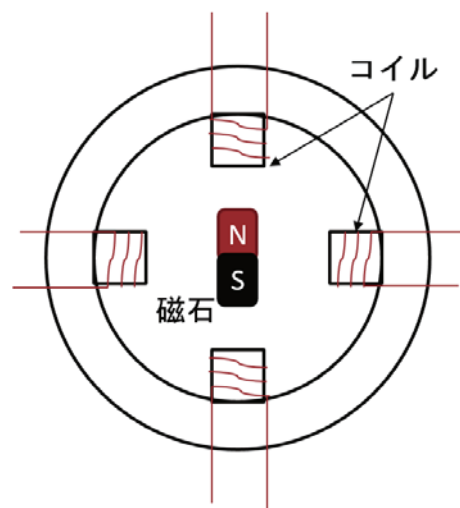


図4 ステッピングモータの原理

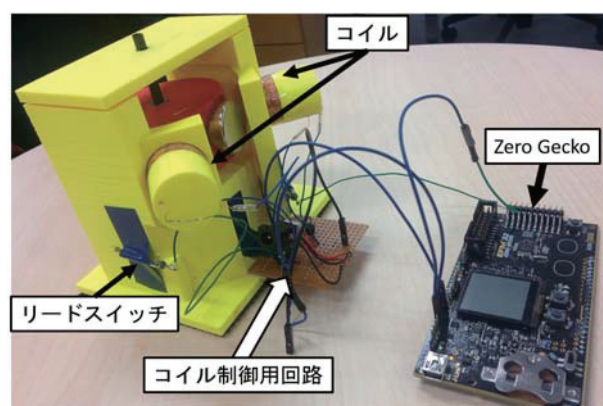


図5 3Dプリンタを用いた実装(第1段階)



図6 磁石の浮遊機構

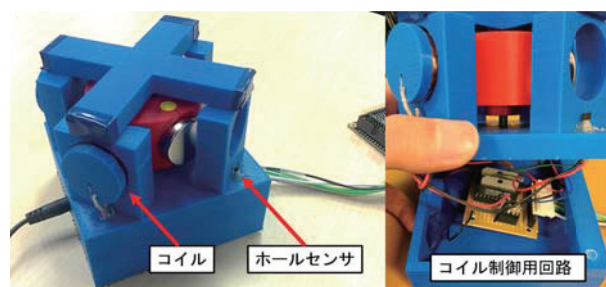


図7 3Dプリンタを用いた実装(第2段階)

を提案する。マーカとスマートフォンの位置関係は、磁場マーカからの相対的な距離の推定と相対的な角度の推定によって実現する。特定周波数の磁気の強さから距離を推定する。磁場マーカの磁石の磁極がセンサの方向を向いている時にセンサの値は極値を取ると考えられる。磁場マーカの磁石の向きとスマートフォンの磁気センサの値が極値を取るタイミングから相対的な角度を推定する。

6.1 距離推定

まず磁場マーカとスマートフォンの距離を磁気センサの値から推定するために磁気センサの値と距離との関係を調査する。磁気センサの値の変化幅(極大値と極小値の差)は磁場マーカから離れるほど小さくなる。そこで磁気センサの値の変化幅は磁場マーカとスマートフォンの距離と相関があると考えた。

この相関関係は図2の計算式と関係があると考え実験を行った。図8に実験の概要図を示す。磁場マーカの近くにスマートフォンをディスプレイが磁場マーカの方を向くように立てて設置する。これは磁気センサは3軸あるがそのうちの1軸(z軸)に最も影響を与えられるようにするためである。磁場マーカとスマートフォンの距離は20cmから100cmまでを5cmずつ変化させた。計測時間は10秒間で、磁場マーカの磁石の回転速度は約6Hzである。

計測した磁気センサの値をそのまま用いるのではなくノイズ除去処理してから変化幅を取得する。磁気センサのz軸の値に対して磁場マーカ以外の影響を除くためにバンドパスフィルタを適用する。通過周波数領域は2から25Hzである。バンドパスフィルタ適用後の波形を図9に示す。この図9の波形の極値を微分値を用いて取得する。値の傾きが正から負へ変わる時を極大値とし、負から正へ変わる時を極小値とする。10秒間分の極大値と極小値の差を取得しその差の平均を結果とした。この実験の結果を図10に示す。図10の青線が計測値で赤線が図2の計算式から導出した値である。60cmより離れた場合は近い値になっているが、30cm以下の場合では大きく異なっている。最大で200 μ T以上異なる場合がある。

図2の計算式からは磁場マーカとスマートフォンの距離は推定するのは難しいため他の手法を考える必要がある。計測値は計算式から導出した値と同じように距離の累乗で減衰していると分かる。そこで、計測値から近似曲線を導出しその近似曲線の式から距離を導出できると考えた。そのため、計測回数を増やし計測値から近似曲線を導出した。各距離で新たに3回計測を行い、同様の処理をした結果を図11に示す。

図11の近似曲線は3回の計測結果の平均値から導出している。累乗近似曲線は $y = cx^b$ に基づいて最小二乗適合の計算を行ってcとbを導出している。導出した近似曲線の決定係数 R^2 値は0.9988とほぼ1に近い値であるため、

この曲線はデータに対してほぼ適合していると分かる。この近似曲線を用いて磁場の変化幅から磁場マーカとスマートフォンの距離を取得する。近似曲線の式は式2であり、磁場の変化幅から距離を推測する式に式変形すると式3になる。(yは磁場の変化幅, xは磁石と端末の距離)。この式から磁場マーカとスマートフォンの距離の推定を行う。

$$y = 5.2721x^{-2.588} \quad (2)$$

$$x = \left(\frac{y}{5.2721}\right)^{\frac{1}{2.588}} \quad (3)$$

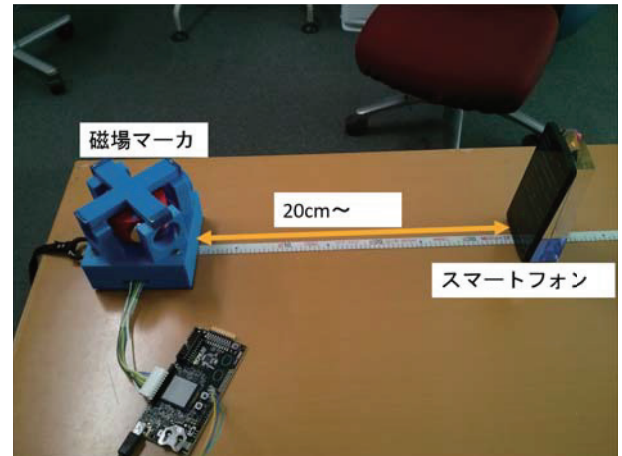


図8 磁場マーカとスマートフォンの距離を推定する実験の様子

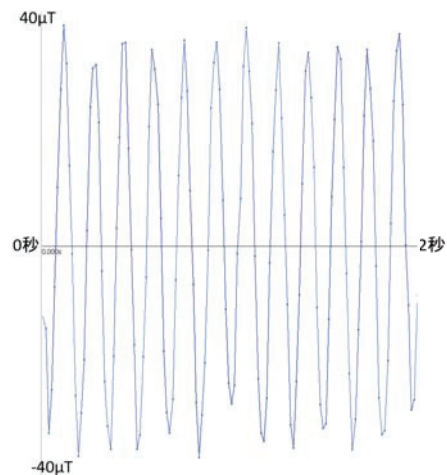


図9 端末を固定して計測した際の磁気センサの値(バンドパスフィルタ適用後)

6.2 角度推定

スマートフォンの磁場マーカからの方向を推定するために磁石の角度情報と磁気センサの値が極値を取るタイミングを1つに統合する必要がある。2つの情報を統合するために磁場マーカの磁石の角度情報はZero GeckoからUART通信により取得し、スマートフォンの磁気センサの値はUDP通信により取得し1つのパソコンに統合した。この

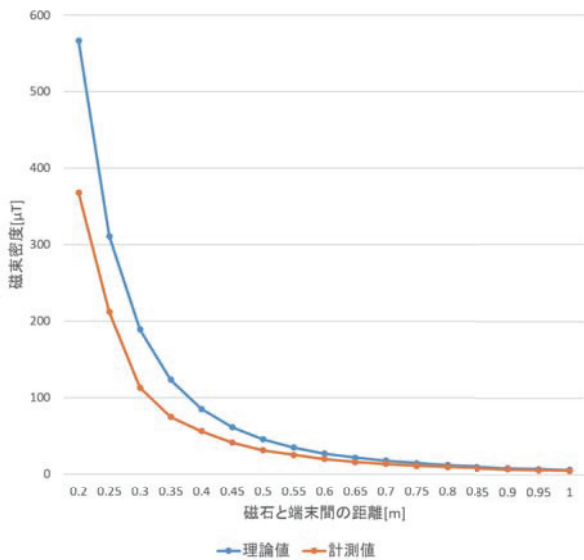


図 10 磁場マーカと端末の距離と計測値の変化幅と計測値の関係

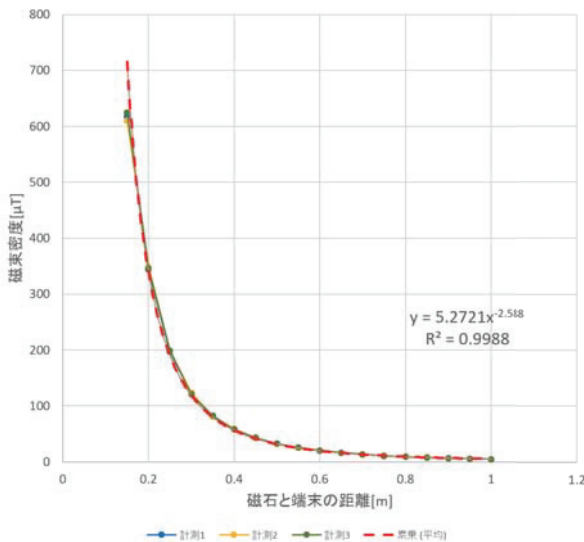


図 11 磁場マーカと端末の距離と計測値の変化幅と近似曲線

システムの概要図を図 12 に示す。図 12 のようにスマートフォンは時間と磁気センサの x, y, z 軸の値を送信している。磁場マーカは磁場マーカに内蔵されているホールセンサの値を送信している。Zero Gecko では時間の取得は難しかったため、磁場マーカの情報の時間は UART 通信で受け取った時に受け取り側のパソコンが付与している。このように磁場マーカとスマートフォンの磁気センサ値の情報を統合した。

次に受け取った磁場マーカとスマートフォンのセンサ情報を利用できる情報に変換する。まず磁気センサの極値を取るタイミングを計算するが、これは 7.1 節の距離推定と同様で z 軸の値に対してバンドパスフィルタを行った後に微分法で傾きの正負の変化を用いて取得している。磁石の角度は磁場マーカのホールセンサの値から変換している。これは各磁石の角度でのホールセンサの値を計測した結果

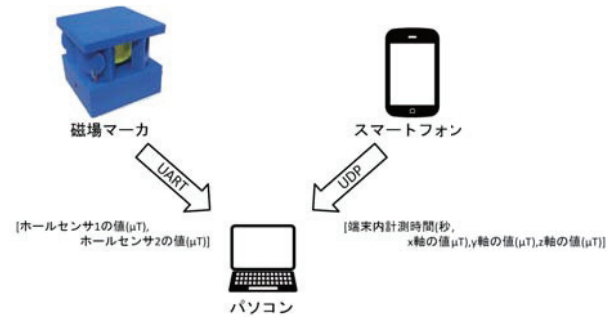


図 12 磁場マーカの情報とスマートフォンのセンサ情報の統合手法の概要図

を保存しておき、現在どの角度の時の値に近いかを判定して閾値以内であればその角度であると判定している。現在判定できる角度は 0 度、45 度、90 度、135 度、180 度、225 度、270 度、315 度の 8 分割である。このように受け取ったそれぞれの情報から目的である磁気センサの値が極値を取るタイミングと磁石の角度情報を 1 つのパソコン上に統合した。

極値を取るタイミングと磁石の角度情報からスマートフォンの磁場マーカからの方向を推定する手法を図 13 を用いて説明する。図 13 の一番上のグラフは磁石の角度の時間変化を表している。図 14 に示す 8 つの角度になった時のタイミングを取得している。図 13 の一番下のグラフは 6.1 節で説明したノイズ除去処理などを行った後の磁気センサの値の時間変化を示している。図 13 の下 2 つのグラフに引いた緑色の線はスマートフォンの磁気センサの値が極値を取ったタイミング (T_A) であり、赤色の線は磁石が正解角度になったタイミング (T_B) である。磁気センサの極値のタイミングをセンサ値の極値から取るとサンプリング周波数の関係で正しい極値のタイミングでない場合がある。そこで、磁気センサの値の変化は周期関数になっていると考え磁気センサの値が 0 になったタイミングを用いて極値を取るタイミングを取得する。図 13 の零交差点 A と零交差点 B の中心を極値のタイミングとする。

図 13 の T_A と T_B には差がある。これは磁場マーカの情報は統合先のパソコンが時間を付与しているためその分遅延が発生していると考えられる。そのため平均的に発生する遅延として 21ms 分を考慮して計算する。極値を取ったタイミングを $T_A - 21$ として、このタイミングに最も近い角度を探索する。図 13 の場合は 90 度が最も近いタイミングとなる。ここから最も近い角度からどのくらいズレているかを計算する。現在の回転周期を $T(\text{ms})$ とすると、1ms に回転する角度は $\frac{360}{T}$ となる。 $(T_B - (T_A + 21)) \times \frac{360}{T}$ で最も近い角度からのズレが計算でき、最も近い角度を R とすると極値を取った時の磁石の角度 $a[\text{度}]$ は式 4 のようになる。この処理は極大値、極小値に対して行われる。極小値の場合は推定した角度は逆側を向いているため 180 度分加算している。この処理を数秒間行い、最も多く推定された

角度をスマートフォンがいる方向と推定している。

$$a = \begin{cases} R + (T_B - (T_A + 21)) \times \frac{360}{T} & (\text{Maximum}) \\ R + (T_B - (T_A + 21)) \times \frac{360}{T} + 180 & (\text{Minimum}) \end{cases} \quad (4)$$

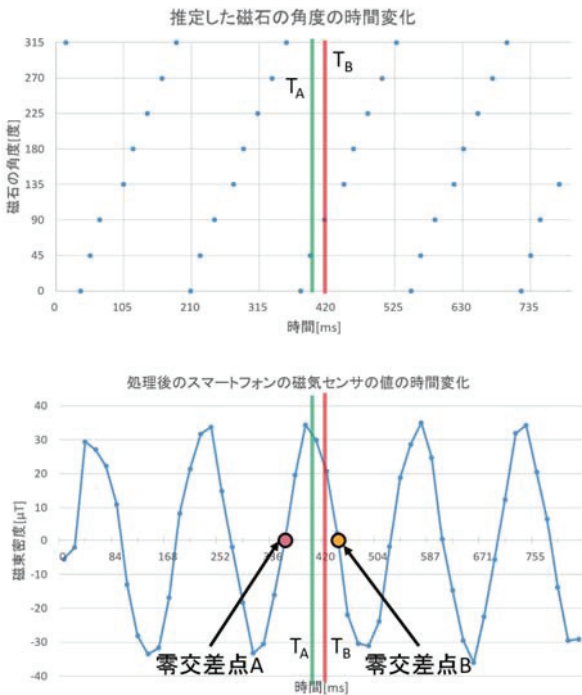


図 13 磁場マーカの角度取得の説明図

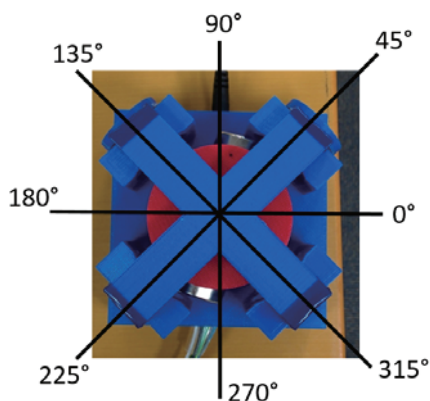


図 14 磁場マーカの磁石の取得可能な角度

7. 評価実験

本章では、磁場マーカとスマートフォンとの位置推定精度を評価するため、距離推定と角度推定のそれぞれに関して実験を行った。

7.1 距離推定の評価

図 8 に距離推定評価実験の概要図を示す。磁場マーカの近くにスマートフォンをディスプレイが磁場マーカの方を向くように立てて設置する。磁場マーカとスマートフォンの距離は 20cm から 200cm までを 10cm ずつ変化させて計測した。計測回数は各距離につき 10 回計測した。計測時間は 5 秒間で、磁場マーカの磁石の回転速度は約 6Hz である。スマートフォンの磁気センサのサンプリング周波数は約 60Hz である。距離推定は 64 サンプル毎に行い正解距離との誤差を計算し、5 秒間の平均誤差を結果とした。

評価実験の結果を図 15 と図 16 に示す。図 15 の黒い線は誤差範囲を示している。誤差範囲は標準偏差である。図 16 から距離が 1.4m 以内であれば 4cm 以内の誤差で距離が推定できると分かった。誤差範囲は距離が大きくなるほど広がっている。これは磁場マーカから遠くなるほど磁石の影響が小さくなりノイズの影響が相対的に大きくなるためだと考えられる。実験結果からは誤差は磁場マーカとの距離が 1.2m 以下の場合には正解距離よりも短いと推定されやすく、それ以上の距離では正解距離よりも遠いと推定されやすくなっている。これは使用した近似曲線の特性であると考えられる。

比較のため別の近似曲線の式を用いて計算した。今回の実験データから導出した近似曲線の式は式 5 である。

$$x = \left(\frac{y}{5.2721} \right)^{\frac{1}{2.588}} \quad (5)$$

この式 5 を用いて今回の実験データの推定距離と誤差を計算した結果が図 17 と図 18 である。図 16 と図 18 を比較すると図 18 も正解距離が大きくなるほど誤差は大きくなっているが、推定距離が正解距離よりも短く推定される距離は図 16 とは異なる。図 16 よりも図 18 は誤差が全体的に小さくなっているが、これは式 5 が今回の実験データを用いているため式 3 より今回の実験データを表すのに適しているためである。

この実験により磁場マーカまでの距離が 2m 以内であれば最大で十数 cm の誤差で距離を推定できると分かった。また磁場マーカまでの距離が 1.4m までであれば 4cm 以内の誤差で距離を推定可能であり十分な精度であると分かった。これにより実験データから導出した近似曲線の式が距離推定に利用可能であると分かった。

7.2 角度推定の評価

角度推定がどのくらいの精度で推定可能なかを評価するために実験を行った。スマートフォンの磁場マーカからの方向は 0 度から 315 度までを 45 度ずつ変化させた。磁場マーカとスマートフォンの距離は 50cm で計測は各角度で 10 回行った。スマートフォンはディスプレイが磁場マーカの方を向くように立てて設置した。計測時間は 5 秒間で角度の推定結果は極値を取った回数分推定を行い、最も

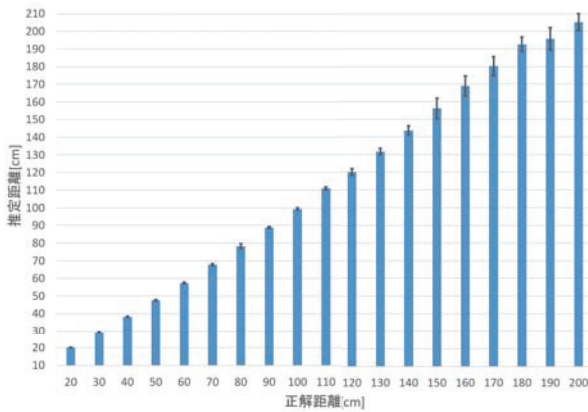


図 15 磁場マーカと端末の正解距離と推定距離

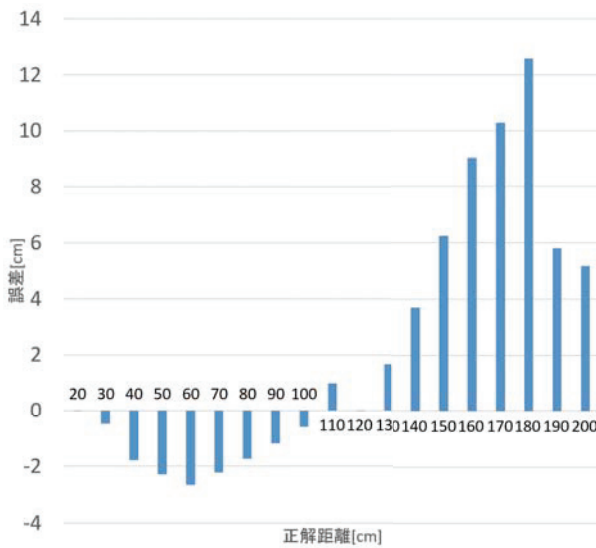


図 16 磁場マーカと端末の正解距離と誤差平均

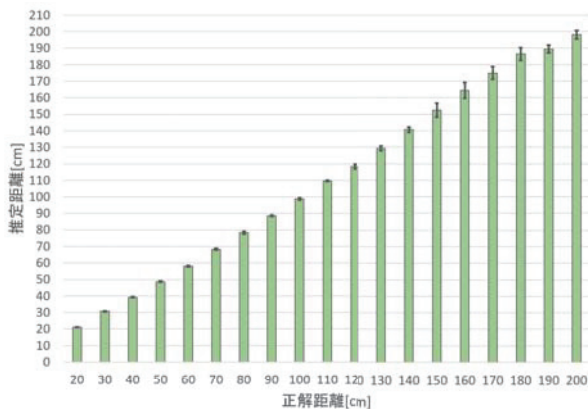


図 17 磁場マーカと端末の正解距離と推定距離 (式 5 を用いて導出)

多く推定された角度を推定結果としている。

図 19 に実験の結果を示す。横軸は 80 個あるデータのインデックスで縦軸は正解角度と推定角度との誤差である。ほとんどのデータが 40 度以下になっているが、いくつか 90 度を超える誤差がある。全データの平均誤差は 24 度で標準偏差が 29 となっている。これは 90 度を超える誤差な

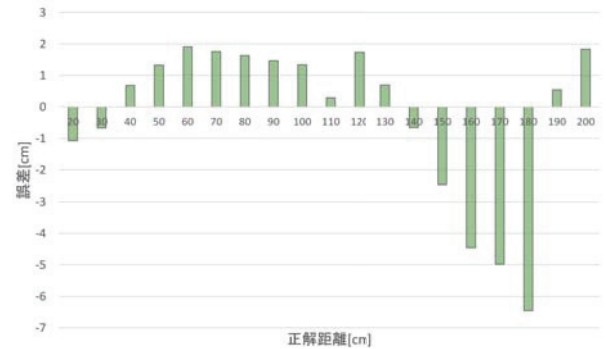


図 18 磁場マーカと端末の正解距離と誤差平均 (式 5 を用いて導出)

どが原因である。90 度以上の誤差になったデータを除いた場合、平均誤差は 17 度で標準偏差は 15 度であった。今後は大幅な誤差が生じないようにする工夫を考える必要がある。

この実験により磁場マーカから見たスマートフォンの方向推定が平均 24 度の誤差で推定できると分かった。また誤差の標準偏差が 29 度と大きく、最大で 160 度を超える角度誤差が確認された。平均角度誤差と誤差の標準偏差を考慮しても磁場マーカを基準とした東西南北の 4 方向のうちどの方向にスマートフォンがあるかは判定できると分かり、手法の改善の必要があると思われる。

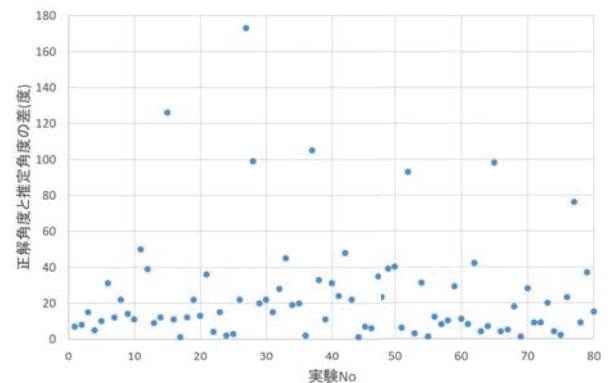


図 19 角度誤差の分布

8. おわりに

本稿では、磁場マーカ圏内の詳細な位置を推定するためのマーカデバイスと検出手法を提案した。提案手法のねらいは高い位置推定精度を必要とする箇所や磁場的に特徴の無い場所に磁場マーカを設置し位置推定を行うことである。提案手法は他の位置推定手法との組み合わせを考えており、他の位置推定手法では難しいが高い位置推定精度が要求される場所での利用を考えている。提案手法では磁石の磁場を利用しているため電波と異なり狭い範囲に限定して位置推定エリアを生成でき、高い精度で位置推定が可能となっている。

磁場マーカから 2m 以内の範囲でスマートフォンと磁場

マーカとの距離と磁場マーカから見たスマートフォンの方角をどのくらいの精度で推定できるかを検証する実験を行った。磁場マーカとスマートフォンとの距離の推定は2m以内ならば最大で13cm以下の平均誤差で推定でき、1.4m以内の範囲であれば4cm以下の誤差で推定可能である。磁場マーカから見たスマートフォンの方角の推定は平均誤差が24度で標準偏差が29度の精度であった。

距離推定と角度推定ではスマートフォンが静止しており、スマートフォンの姿勢も磁場マーカの磁場を最も計測しやすい状態を想定して評価実験を行っている。しかし、実環境を想定した場合このように理想的な姿勢とは限らない。そのため、スマートフォンの姿勢に依らず距離と角度を推定できるようにする必要がある。また角度推定では、90度以上の誤差が発生する場合がありますこれが平均誤差を大きくしている原因の1つとなっている。そのため、このような大きな誤差が発生する原因を解明し対策を行う必要がある。

今後の展望として磁場マーカとBLEビーコンとの組み合わせが考えられる。提案手法は2m程度の狭い範囲での高精度な位置推定が可能であるが、それ以上広い範囲で位置推定を行いたい場合は別の位置推定手法を利用しなければならない。そこで、磁場マーカとBLEビーコンを組み合わせることで広い範囲をBluetoothを用いた位置推定手法で位置推定を行い、一定の範囲内に入ったら磁場マーカで高精度に位置を推定する手法を検討している。

参考文献

[1] 興梠正克, 大隅隆史, 蔵田武志. 歩行者ナビのための自蔵センサモジュールを用いた屋内測位システムとその評価. シンポジウム「モバイル08」予稿集, pp. 151-156, 2008.

[2] John Krumm and Ken Hinckley. The NearMe Wireless Proximity Server. *UbiComp 2004: Ubiquitous Computing*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 283-300, 2004.

[3] Irfan Oksar. A Bluetooth Signal Strength Based Indoor Localization Method. In *2014 International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP)*, pp. 251-254. IEEE, 2014.

[4] 遠藤巖, 藤田悟. 複数のセンサを組み合わせた屋内歩行者位置推定. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2013 論文集, Vol. 2013, pp. 188-195, 2013.

[5] Ryoji Ban, Katsuhiko Kaji, Kei Hiroi, Nobuo Kawaguchi. Indoor Positioning Method Integrating Pedestrian Dead Reckoning with Magnetic Field and WiFi Fingerprints. *The Eighth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU2015)*, pp. 167-172, 2015.

[6] 村田雄哉, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 歩行時の磁気センシングデータを利用した屋内位置推定手法. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2015 論文集, Vol. 2015, pp. 1024-1030, 2015.

[7] 武島知勲, 梶克彦, 廣井慧, 河口信夫, 神山剛, 太田賢, 稲村浩. 通路に設置した回転する磁石による歩行者の通過検出手法. マルチメディア, 分散協調とモバイルシンポジウム2015 論文集, Vol. 2015, pp. 691-699, 2015.

[8] 木嶋啓, 藤井雅弘, 渡辺裕. Bluetoothの受信強度を用いた位置推定システムにおける補正による推定精度改善に関

する一検討. 第73回全国大会講演論文集, 第2011巻, pp. 271-272, 2011.

[9] 佐藤智美, 小宮山哲, 下田雅彦, 劉渤江, 横田一正. Bluetoothの電波強度を用いた位置推定方式の検討. In *DEIM Forum*, 2011.

[10] Valter Pasku Guido De Angelis, Alessio De Angelis, Marco Dionigi, Mauro Mongiardo, Antonio Moschitta, Paolo Carbone. An Indoor AC Magnetic Positioning System. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 5, pp. 1275-1283, 2015.

[11] Jörg Blankenbach, Abdelmoumen Norrdine, Hendrik Hellmers. Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System. *International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, 2011.

[12] 新納敏文. 環境磁場の計測と数値シミュレーションに関する研究. 岡山大学学位論文, 2000.

[13] 電磁気3. <http://202.253.248.12/gijutu/flow/www.kdcnet.ac.jp/buturi/kougi/buturiko/electcity/elemag3/elemag3.htm>. 2015年11月参照.

[14] 松永文彦. 携帯電話使用が歩行回避行動に及ぼす影響について. 東京大学修士論文, 2005.

[15] 永久磁石の設計3 (チャージモデル). http://www.daido-electronics.co.jp/qa/magnet_qa/documents/magnet_qa08.pdf. 2015年7月参照.

[16] ミニモーター多段ギヤボックス (12速). http://www.tamiya.com/japan/products/70190mini_multiratio/index.html. 2015年2月参照.

[17] ステッピングモータの基本的な構造と動作原理. http://www.orientalmotor.co.jp/tech/webseminar/stkiso_2_1_1/. 2016年1月参照.

[18] EFM32 Zero Gecko — Silicon Labs. <http://www.silabs.com/products/mcu/32-bit/efm32-zero-gecko/Pages/efm32-zero-gecko.aspx>. 2016年1月参照.